

## 重イオン慣性核融合のための重イオンビームのパルス圧縮を模擬する 小型電子装置を用いたビーム物理研究

### BEAM PHYSICS STUDY ON PULSE COMPRESSION OF HEAVY ION BEAM IN HEAVY ION INERTIAL FUSION USING COMPACT ELECTRON SIMULATOR

菊池 崇志<sup>#,A)</sup>, 佐藤 知拓<sup>A)</sup>, 小森 拓弥<sup>A)</sup>, 朴 英樹<sup>B)</sup>, 曾我 之泰<sup>B)</sup>,  
酒井 泰雄<sup>C)</sup>, 堀岡 一彦<sup>C)</sup>, 高橋 一匡<sup>A)</sup>, 佐々木 徹<sup>A)</sup>, 原田 信弘<sup>A)</sup>  
Takashi Kikuchi<sup>#,A)</sup>, Tomohiro Sato<sup>A)</sup>, Takuya Komori<sup>A)</sup>, Youngsoo Park<sup>B)</sup>, Yukihiro Soga<sup>B)</sup>,  
Yasuo Sakai<sup>C)</sup>, Kazuhiko Horioka<sup>C)</sup>, Kazumasa Takahashi<sup>A)</sup>, Toru Sasaki<sup>A)</sup>, Nob. Harada<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Nagaoka University of Technology

<sup>B)</sup> Kanazawa University

<sup>C)</sup> Tokyo Institute of Technology

#### Abstract

In an inertial confinement fusion system, a high temperature and dense fuel core causes nuclear fusion reactions. To form the high temperature and dense fuel core, an extreme compression process of the fuel target pellet "implosion" is carried out by irradiating high current heavy ion beams. The irradiated target pellet causes the plasma expansion, and the reaction by the expansion of the ablation plasma causes the implosion of the fuel pellet. Some accelerator systems were proposed for the inertial confinement fusion driven by heavy ion beams. The heavy ion beam current of kA order is required at the last stage in the accelerator complex. The beam parameter is far from the conventional accelerator beams. Consequently, the beam dynamics researches are necessary for the heavy ion inertial fusion system. Especially, the beam dynamics with space charge effect is important due to the high beam current. Additionally, the manipulation of the extreme longitudinal pulse compression is required to increase the beam current with the short pulse duration of the implosion time scale. The heavy ion accelerator becomes large, and is so expensive. For this reason, we proposed compact simulators with electron beam and electron trap device. Also, numerical simulation approaches by multi-particle tracing calculations are carried out, corresponding to the experimental conditions for the compact simulators.

#### 1. はじめに

重イオンビームを燃料標的へ照射し、アブレーションプラズマの膨張とその反作用によって急激な圧縮（爆縮）を行い、中心で瞬間的に高温・高密度状態を形成して核融合反応を起こす慣性核融合方式は「重イオン慣性核融合」と呼ばれ、大電流の重イオンビームが必要とされる<sup>[1]</sup>。いくつかの加速器システム構成が提案され、それぞれパラメータは異なるが、いずれも最終段では kA 級の重イオンビームが要求される。通常の加速器で生成されるビームのパラメータとは大幅に異なるため、重イオン慣性核融合に固有のビーム動力学の検討が必要である。特に、大電流であることから、空間電荷効果の影響が無視できないビーム物理を扱うことが特徴である。

重イオン加速器システムの最終段では、燃料ペレットの爆縮時間スケール（10~100ns）に合わせ、ビームの電流を上昇させるために、進行方向に急激なパルス圧縮を行う操作も特殊な課題である。進行方向のパルス圧縮によって、重イオンビームはエミッタンスが支配的な領域から空間電荷効果が支配的な領域へ移行する。このため、急激なパルス圧縮過程でビームのエミッタンス増加が予想される。エ

ミッタンスの増加は燃料標的へのビームの集束を妨げる要因となるため、最終集束系の設計のためにはエミッタンスの増加や粒子軌道を精度良く予測する必要がある。一方で、空間電荷効果が強く影響するビーム領域は、その動力学が強い相関を持つ多体問題となるため、理論的・解析的に予想することが困難である。

重イオン慣性核融合の最終段パルス圧縮のためには長距離の線形加速器が必要となるため、重イオン加速器は大型となり高価なため、実機サイズの実験的な研究は実施が難しい。このため、小型で空間電荷効果が効く状態のビームを容易に生成できる、電子による模擬実験装置を用いた実験的検討が行われている。また、実験条件に合わせた多粒子の軌道計算によって、実験だけでは評価できないビーム動力学を検討している<sup>[2]</sup>。

本研究では、電子バンチによる小型模擬実験装置を用いた研究について、重イオン慣性核融合のための重イオンビームを模擬するに当たって重要な項目となる、空間電荷効果が支配的なビームとなっているかどうかを評価するため、tune depression を見積もった。また、実験条件に合わせた数値シミュレーションを行い、実験結果と比較し、計算モデルの妥当性を評価した。

<sup>#</sup> tkikuchi@vos.nagaokaut.ac.jp

## 2. 空間電荷効果が支配的なビームのパルス圧縮を模擬する電子による小型実験装置のパラメータ

電子を用いて構成する小型模擬実験装置が、重イオン慣性核融合の大電流重イオンビームをどの程度模擬できるかを検討する必要がある<sup>[2]</sup>。特に、空間電荷効果が支配的なビームパラメータが特徴であるため、ここでは荷電粒子ビームの空間電荷効果の指標となる tune depression を用いて検討する。Tune depression は下記の式で与えられる<sup>[3]</sup>。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{1 + u^2} - u \quad (1)$$

ここで、

$$u = \frac{K}{2k_0\epsilon} \quad (2)$$

であり、 $K$  は perveance<sup>[3]</sup>

$$K = \frac{\omega_p^2 a}{2\beta^2 c^2} \quad (3)$$

$k_0$  はソレノイド磁場による閉じ込め場の波数<sup>[3]</sup>

$$k_0 = \frac{|qB|}{2mc\beta\gamma} \quad (4)$$

そして、エミッタンスは次のように書ける<sup>[3]</sup>。

$$\epsilon = \frac{2a}{\beta c} \left( \frac{k_B T_e}{\gamma m} \right)^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 $a$  はビーム半径、 $\beta$  は光速  $c$  に対する相対速度、 $q$  は電子の電荷量、 $B$  はソレノイドによる印加磁束密度、 $m$  は電子の質量、 $\gamma$  は相対論因子、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T_e$  は電子ビームの温度である。 $\omega_p$  はプラズマ角周波数であり、次の式で表される<sup>[3]</sup>。

$$\omega_p^2 = \frac{q^2 n}{\epsilon_0 \gamma^3 m} \quad (6)$$

ここで、 $n$  は電子の数密度で  $\epsilon_0$  は真空での誘電率である。

式(3)から式(6)を式(2)へ代入することで、

$$u = \frac{qna}{4\epsilon_0 \gamma^2 B} \left( \frac{\gamma m}{k_B T_e} \right)^2 \quad (7)$$

となる。

式(1)と式(7)より、tune depression を見積もった結果を Figure 1 に示す。東京工業大学の誘導電圧発生モジュールを用いた小型の電子ビーム実験装置<sup>[4,5]</sup>のビームパラメータとして、 $a = 0.5$  mm および  $T_e = 0.1$  eV とした。また、金沢大学の Malmberg-Penning Trap 装置<sup>[6,7]</sup>のパラメータを想定し、 $a = 10$  mm および  $T_e = 1$  eV とした。どちらの小型実験装置でも電子群は非相対論の領域であるため、 $\gamma = 1$  である。さらに、Figure 1 には、重イオン慣性核融合の最終段で想定されている tune depression も合わせて示している<sup>[8]</sup>。Figure 1 に示した通り、電子で模擬した小型実験装置を用いて、重イオン慣性核融合の最終段パルス圧縮過程での空間電荷効果が支配的なビームの状況が模擬できると考えられる。

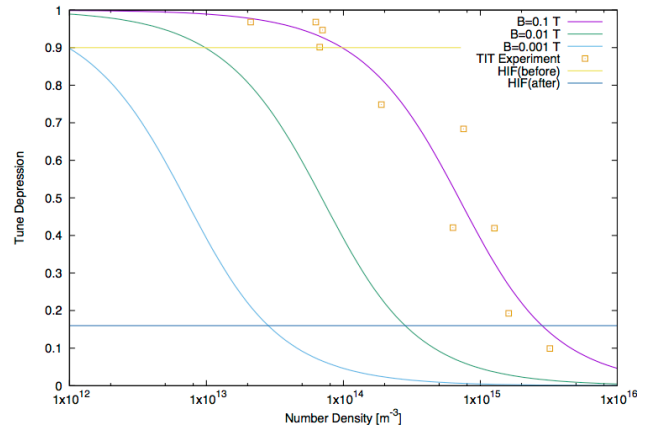


Figure 1: Tune depression of electron compact simulator.

## 3. 電子による小型模擬実験装置を用いたパルス圧縮実験と計算結果の比較

東京工業大学の誘導電圧発生モジュールを用いた、小型の電子ビーム実験装置<sup>[4,5]</sup>では、5つのパルス電圧発生モジュールから供給される電圧波形が重畳され、加速ギャップにビームを圧縮するための電圧が発生する。電子銃から熱電子放出された電子バンチは、この加速ギャップでパルス圧縮電圧を与えられ、ソレノイド磁場によって半径方向に閉じ込められながら、進行方向に短くなる。

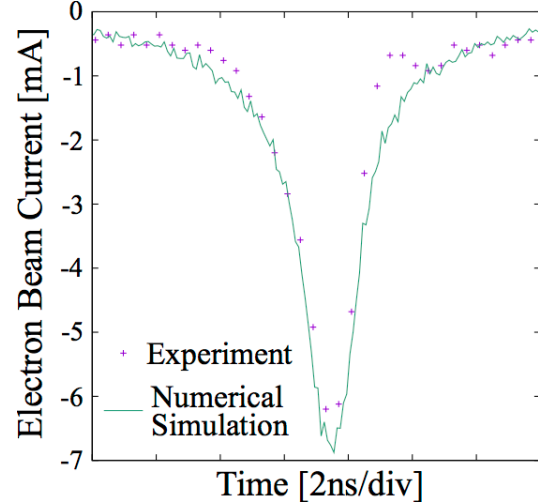


Figure 2: Beam current for experimental and numerical results after longitudinal pulse compression.

Figure 2 に電子ビームを用いた小型模擬実験装置でのパルス圧縮の実験結果<sup>[9]</sup>とクーロン相互作用を考慮した3次元多粒子軌道計算コード<sup>[10]</sup>を用いた実験条件に合わせたパラメータで計算した結果を示す。Figure 2 は、電子銃から熱電子放出し、2.8 kV の印加電圧で加速した電子バンチへ、パルス圧縮のために誘導電圧モジュールを用いて速度変調電圧を加え、1.93 m のソレノイド電磁石中をドリフトさせた結果である。実験ではソレノイド輸送路終端に置いたファラデーカップを用いて電子ビーム電流を測定し、

数値シミュレーションでは軌道計算結果の粒子分布からビーム電流を算出した。進行方向に印加した磁束密度分布は 11 mT である。数値シミュレーションでは、輸送距離終端で 1 点に集束するような理想的な電圧波形<sup>[4,5,9,10]</sup>を与えている。初期ビーム電流は 265  $\mu\text{A}$  である。

Figure 2 より、実験結果と数値シミュレーション結果は良く一致しており、計算モデル・計算手法は妥当だと考えられる。数値シミュレーションでは、実験的な手法では得ることが難しい位相空間分布の情報などを得ることが容易であるため、今後は数値シミュレーション結果を詳細に解析し、空間電荷効果によって進行方向パルス圧縮が阻害される過程やその程度、エミッタンス増加への寄与などを評価する。

#### 4. まとめ

理論的・数値計算的アプローチだけでなく、実験によるアプローチで荷電粒子ビームの挙動を検討することも重要である。しかし、粒子加速器、特に空間電荷効果がビーム挙動に強く影響を及ぼすような状況を示す粒子加速器を製作することは経済的に困難であるため、大学の研究室・実験室レベルで行える小型の模擬粒子加速器を製作し検討が行われている<sup>[11,12]</sup>。本研究では、大電流の重イオンビームを発生する粒子加速器を実機スケールで製作することは難しいため、空間電荷効果が支配的な状況を容易に模擬できるような電子による小型実験装置で空間電荷効果が支配的な粒子ビームの状態を作り出し、その様子を観測している。

東京工業大学・堀岡研究室では重畳型誘導電圧モジュールによって進行方向にパルス圧縮可能な電子ビーム小型実験装置<sup>[4,5]</sup>を、金沢大学では Malmberg-Penning Trap<sup>[6]</sup>を応用した電子群による小型実験装置によって空間電荷効果が効いている状態のビーム動

力学の実験的検討が行われている<sup>[7]</sup>。また、それらの実験条件に合わせた数値シミュレーションも行っており<sup>[10,13]</sup>、実験結果と数値解析の両面によるアプローチで空間電荷効果が支配的なビーム物理を検討している。

#### 参考文献

- [1] 例えば、堀岡 一彦、他：「重イオン慣性核融合のためのエネルギードライバー開発の進展」、プラズマ・核融合学会誌 (小特集) 89 (2013) 87.
- [2] 菊池崇志、他：Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 3-5, 2013, Nagoya, Japan) SAP031
- [3] M. Reiser, "Theory and Design of Charged Particle Beams" (Wiley, New York, 1994).
- [4] A. Nakayama, Y. Sakai, Y. Miyazaki, T. Kikuchi, M. Nakajima, and K. Horioka, EPJ Web of Conferences 59 (2013) 09005.
- [5] Y. Sakai, M. Nakajima, J. Hasegawa, T. Kikuchi, and K. Horioka, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 733 (2014) 70.
- [6] Y. Soga, Y. Kiwamoto, and N. Hashizume, Phys. Plasmas 13 (2006) 052105.
- [7] Y. Park, Y. Soga, Y. Mihara, T. Kikuchi, Y. Sakai, K. Horioka, and M. Sato, Plasma Conf. 2014 (2014) 20PA-031.
- [8] T. Kikuchi, M. Nakajima, K. Horioka, and T. Katayama, Phys. Rev. ST-AB 7 (2004) 034201.
- [9] 酒井泰雄、他：電気学会パルスパワー研究会 (2014) PPT-14-011
- [10] T. Kikuchi, K. Horioka, K. Takahashi, T. Sasaki, T. Aso, and Nob. Harada, Prog. Nucl. Energy 82 (2015) 126.
- [11] 岡本 宏己、他：「ビーム物理の世界～近くて遠い隣の分野～」、プラズマ・核融合学会誌 86 (2010) 451.
- [12] 岡本 宏己、伊藤 清一、檜垣 浩之：「実験室加速器物理」、日本物理学会誌 68 (2013) 818.
- [13] T. Sato, Y. Park, Y. Soga, K. Takahashi, T. Sasaki, T. Kikuchi, and Nob. Harada, Plasma Conf. 2014 (2014) 20PA-025.